中国生态农业学报 2017 年 7 月 第 25 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2017, 25(7): 1042−1051

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.161141

薛思嘉, 杨再强, 李军. 高温对小白菜品质的影响及模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1042−1051
Xue S J, Yang Z Q, Li J. Effect of high-temperature on the quality of pakchoi and its simulation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 1042−1051

高温对小白菜品质的影响及模拟研究*

薛思嘉[1], 杨再强[1**], 李 军[2]

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044; 2. 上海市气候中心 上海 200030)

摘 要: 为了研究高温胁迫对小白菜品质指标的影响, 以'华王'为试材, 于 2015 年 10 月—2016 年 5 月进行分批播种试验, 设置昼温/夜温为 32 ℃/22 ℃、35 ℃/25 ℃、38 ℃/28 ℃共 3 个梯度, 持续处理时间分别为 3 d、6 d、9 d、12 d, 以 25 ℃/18 ℃为对照(CK)。各处理结束 2 d 后测定小白菜外观形态、SPAD 值、单株干鲜重和粗纤维、可溶性糖、可溶性蛋白、维 C 的含量, 建立小白菜卷叶率和单位面积产量与最高气温、最低气温、平均气温及持续时间的回归模型, 并用实测数据检验模型的模拟效果。结果表明: 小白菜单株干重、鲜重、叶片鲜重、叶片长度、叶片宽度、叶柄宽度、SPAD 和单位面积产量均随高温胁迫的加剧和胁迫时间的延长而呈降低趋势。随温度的升高和持续时间的延长, 叶片内叶柄长度、卷叶率逐渐增加。高温胁迫使小白菜粗纤维含量升高。短期高温胁迫下可溶性糖、可溶性蛋白、维 C 含量变化不明显, 随胁迫时间的延长、胁迫温度升高逐渐降低。通过多元回归方法, 分别构建了小白菜卷叶率和单位面积产量与最高处理气温、最低处理气温、平均处理气温及各处理所对应持续时间的关系模型。对模型的检验结果表明, 小白菜卷叶率与最低处理温度和最低温度持续时间构建模型模拟效果最好, 回归估计标准误差和相对误差分别为 7.59%和 0.189 4; 单位面积产量与最高处理温度和最高温度持续时间构建模型模拟效果最好, 回归估计标准误差和相对误差分别为 274.02 $g\cdot m^{-2}$ 和 0.073%。研究认为随高温胁迫强度加剧、胁迫时间延长, 小白菜产量降低, 口感变差, 营养物质含量减少, 说明高温胁迫使小白菜品质变差。

关键词: 高温胁迫; 小白菜; 品质; 生育期; 模拟模型
中图分类号: S16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)07-1042-10

Effect of high-temperature on the quality of pakchoi and its simulation*

XUE Sijia[1], YANG Zaiqiang[1**], LI Jun[2]

(1. Collaborative Innovation Center for Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: To explore the effects of high-temperature stress on yield and quality of greenhouse pakchoi, a study was conducted from October 2015 to May 2016. In the study, we set three gradients of daytime/nighttime temperatures of 32 ℃/22 ℃, 35 ℃/25 ℃, 38 ℃/28 ℃, with 25 ℃/18 ℃ as the control, and the duration of each treatment was 3 d, 6 d, 9 d and 12 d, respectively. The results showed that: (1) the dry weight, fresh weight, leaf fresh weight, leaf length, leaf width, petiole width, SPAD and per unit area yield decreased with increased high-temperature stress. Furthermore, the decline aggravated with increasing treatment duration. (2) Petiole length and rolled leaf rate increased gradually with increased temperature and duration.

* 国家科技支撑计划项目(2014BAD10B07)资助
** 通讯作者: 杨再强, 主要从事农业气象灾害预警的研究。E-mail: yzq@nuist.edu.cn
薛思嘉, 主要从事设施作物气象灾害方面的研究。E-mail: bpxsj5367829@163.com
收稿日期: 2016-12-14 接受日期: 2017-03-21
* This study was supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2014BAD10B07).
** Corresponding author, E-mail: yzq@nuist.edu.cn
Received Dec. 14, 2016; accepted Mar. 21, 2017

High-temperature stress increased the content of crude fiber. Under short-term high-temperature stress condition, the contents of soluble sugar, soluble protein and vitamin C did not change obviously, but gradually decreased due to increased temperature degree and stress duration. (3) A mathematical model of rolled leaf rate and per unit area yield of pakchoi was established and validated by independent experimental data. The root mean square error and relative error of model of rolled leaf rate with minimum temperature and treatment time were small — respectively 7.59% and 0.189 4. The model for yield per unit area with maximum temperature and treatment time were smaller — also respectively 274.02 $g\cdot m^{-2}$ and 0.073%. Our study suggests that high-temperature stress downgraded pakchoi appearance quality and internal quality with increasing stress time and degree. Besides, we defined high-temperature stress index and determined high-temperature stress degree for greenhouse pakchoi. The results provided scientific basis for the determination of meteorological indicators and for disaster prevention.

Keywords: High-temperature stress; Pakchoi; Quality; Growth period; Simulation model

小白菜(*Brassica campestris* L. *Chinesis* L.)属十字花科芸薹属芸薹种白菜亚种，又称不结球白菜、普通白菜、青菜、油菜等，是以绿叶为产品的一、二年生草本作物，原产于我国，是目前我国南方地区最大众化的蔬菜，约占长江中下游大中城市蔬菜年总产量的 30%~40%[1-4]。高温热害是南方小白菜生产中最常见的逆境因子[5]，由于南方地区夏季高温导致小白菜品质下降、口干苦涩、植株黄化、老化现象严重，其产量和经济效益明显下降[6-7]。王鑫等[8]指出，辣椒(*Capsicum annuum* L.)在温度高于 35 ℃时，会出现叶片颜色变淡，地上地下干重、鲜重和果实质量均降低等问题。高温影响叶色。有报道指出，无论在苗期还是在抽穗期，高温都能降低水稻(*Oryza sativa* L.)的 SPAD 值，叶绿素相对含量降低[9]。高温胁迫可引起植物细胞膜透性增大而导致电解质渗漏，为防止电解质过多外渗，植物可通过调节体内渗透调节物质的种类和含量以适应逆境环境，可溶性糖、可溶性蛋白均是植物细胞内重要的渗透物质，在高温胁迫下会伴随着在植物体内产生水分胁迫。水分胁迫时植物体内积累各种有机和无机物质，以改变细胞液浓度，从而改变渗透势[10-11]。目前，研究作物品质指标主要是基于作物内在品质指标积累所受环境条件影响，通过数学回归方法建立的预测果实内在品质的生态模型[12]。Stenzel 等[13]模拟柑橘(*Citrus* spp. L.)发育过程中可溶性糖、有机酸和糖酸比的积累，并建立柑橘果实成熟度曲线，果实成熟度是基于计算果实脱氧酸品质来预测的。Slaughter[14]建立了芒果(*Mangifera indica* L.)无损成熟度的方法，成熟度通过颜色、香味来判定。国内外的专家学者根据现有的作物生长发育模型理论和技术对温室作物进行研究，并取得了重要的进展，其实质是对作物生长发育过程及其与环境的关系进行定量描述和预测。一个崭新的作物模型研究领域由此开启，同时作物模型的研究内容也得到了极大的丰富，进一步深化了作物模型研究的发展[15-18]。

目前，高温对小白菜品质的影响和相关模拟研究较少。本试验设置不同的高温水平和持续时间，研究高温对小白菜产量和品质的影响，分别构建小白菜单位面积产量和卷叶率与日最低温、日最高温、日平均温度的回归模型，并比较模型模拟效果。本文定义了高温胁迫指数并根据指数划分胁迫等级，为小白菜产量和外观品质预测提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2015 年 6 月在南京信息工程大学 Venlo 可控试验温室内的人工气候箱(TPG-2009, Australian)进行，并分期进行 6 次播种试验。以小白菜品种‘华王’为试验材料，定植于直径为 12 cm 的营养盆中，当小白菜长到 8~9 片叶时开始处理，试验设置昼温/夜温分别为 32 ℃/22 ℃、35 ℃/25 ℃、38 ℃/28 ℃ 3 个高温处理，处理时间为 3 d、6 d、9 d、12 d。每个处理 16 株，设置 3 个重复，每个处理水肥均控制在正常范围。试验期间，控制人工气候箱相对湿度为 75%，光合有效辐射为 800 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$。以小白菜置于适宜气候条件下正常生长作为对照组 CK(昼温 24 ℃，夜温 18 ℃[19])。在每个处理持续时间结束的第 2 d 分别测定不同处理的单株干鲜重、含水率、外观品质和营养物质含量，统计卷叶率和单位面积产量。

1.2　测定项目与方法

1.2.1　卷叶率的测定

分别测量一个处理下所有叶片平展时的最大宽度和卷叶后自然状态下的最大宽度，并参考乔志霞等[20]设定卷叶标准为：叶片宽度/叶片卷曲后投影宽度≥1，并计算出卷叶率。

1.2.2　SPAD 的测定

各处理随机抽取 3 棵小白菜，用 SPAD 叶绿素仪测定叶片的 SPAD 值。

1.2.3 叶片形态和单株干、鲜重的测定

采取破坏性取样的方法称鲜重。将叶柄与叶片用干净刀片分开，测定叶片重、叶片长宽、叶柄长宽、叶片内叶柄长度[21]。然后放于 105 ℃烘箱中杀青 2 h，80 ℃烘至恒重，测定叶片的干重。

1.2.4 单位面积产量的测定

将营养盆按每平方米 5 盆排列，各处理随机选取 3 组 1 m^2 面积上的小白菜用蒸馏水洗净，吸干表面水分，用千分之一电子天平称量每平方米投影面积上生产小白菜的质量，为小白菜单位面积产量。

1.2.5 小白菜品质的测定

随机选取 3 株小白菜作为重复。粗纤维采用蒽铜比色法测定[22]，可溶性糖采用蒽铜比色法测定[23]，维生素 C 采用 2,6-二氯酚靛酚法测定[24]，可溶性蛋白采用考马斯亮蓝比色法测定[25]。

1.3 确定胁迫等级

高温胁迫指数(I_{HT})由卷叶率(A)和减产率(R)确定[26]，按以下公式计算：

$$I_{HT}=(A+R)/20 \tag{1}$$

$I_{HT}<3$，为轻度胁迫(Ⅰ级)；$I_{HT}=3\sim6$ 为中度胁迫(Ⅱ级)；$I_{HT}>6$ 为重度胁迫(Ⅲ级)[27]。

1.4 数据处理与统计分析

用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 对数据进行整理和分析。

2 结果与分析

2.1 高温对小白菜单株干、鲜重和叶片鲜重的影响

表 1 为不同高温胁迫下小白菜单株干重、鲜重、叶片鲜重的变化。从表 1 可知，在相同的处理时段，CK 的单株干鲜重、叶片鲜重均高于其他温度处理。随着温度升高，单株干、鲜重和叶片鲜重呈减小趋势，且随着持续时间的增加，与 CK 的差异逐渐增大。32 ℃/22 ℃处理 3 d 时，单株干重、鲜重和叶片鲜重与 CK 差异不显著。38 ℃/28 ℃处理 12 d 与 CK 相比，单株干重、鲜重和叶片鲜重分别减少 64.23%、84.32%和 82.89%。

表 1 不同高温处理对小白菜单株干、鲜重和叶片鲜重的影响

Table 1 Effect of different high-temperature stress treatments on fresh weight, dry weight and leaf blade weight of pakchoi

胁迫时间 Stress time (d)	昼/夜温度 Day/night temperature (℃)	单株干重 Dry weight (g)	单株鲜重 Fresh weight (g)	叶片重 Leaf blade weight (g)
3	CK (25/18)	1.73±0.02a	19.71±0.78a	9.34±0.30a
	32/22	1.71±0.01a	19.48±0.41a	9.28±0.33a
	35/25	1.64±0.08a	18.47±0.82ab	8.96±0.29b
	38/28	1.55±0.06b	17.33±0.43b	8.32±0.29b
6	CK (25/18)	2.17±0.05a	25.64±0.71a	13.16±0.15a
	32/22	2.10±0.11a	24.51±0.42a	11.82±0.12b
	35/25	2.03±0.07a	22.95±0.82b	10.42±0.08c
	38/28	1.85±0.05b	18.32±0.29c	9.22±0.17d
9	CK (25/18)	2.72±0.05a	32.94±0.04a	15.88±0.71a
	32/22	2.64±0.06a	31.11±0.34a	14.34±0.29b
	35/25	2.21±0.07b	24.54±0.78b	12.31±0.27c
	38/28	1.58±0.04c	12.11±0.35c	6.27±0.34d
12	CK (25/18)	2.96±0.03a	36.42±0.36a	18.23±0.26a
	32/22	2.85±0.05b	33.42±0.88b	16.33±0.15b
	35/25	2.64±0.04c	28.42±0.39c	14.22±0.33c
	38/28	1.06±0.1d	5.71±0.63d	3.12±0.4d

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平同一处理时间不同温度间差异显著。Different lowercase letters mean significant differences among treatments at the same stress time at 0.05 level.

2.2 高温对小白菜叶片形态的影响

从表 2 可以看出，小白菜叶片长度、宽度和叶柄宽度均以 CK 最大，随着温度升高，叶片长、宽度和叶柄宽度呈逐渐减小的趋势，且随着持续时间的增加，减少幅度增大。

38 ℃/28 ℃处理 12 d 对小白菜叶片形态的影响最显著，叶片的长度、宽度分别较 CK 减少 50.1%和 45.8%。叶片长度的变化幅度更大，受高温胁迫表现更为明显。38 ℃/28 ℃处理 9 d 叶柄长度开始显著降低，38 ℃/28 ℃处理 9 d、12 d 分别比 CK 减少 14.6%、

30.7%。38 ℃/28℃处理持续 9 d 之后，部分叶片出现变黄甚至干枯死亡，导致叶柄长度减小。昼温 25~35 ℃范围内，随温度的升高，叶片内叶柄长度逐渐增加，并随持续时间的延长增加的趋势越加明显，与 35 ℃/25℃处理 12 d 相比，38 ℃/28 ℃处理 12 d 叶柄长度减小 6.58%。

表 2　不同高温处理对小白菜叶片形态的影响

Table 2　Effect of different high-temperature stress treatments on leaf length, leaf width, petiole length, petiole width and petiole length within the blade of pakchoi

胁迫时间 Stress time (d)	昼/夜温度 Day/night temperature (℃)	叶片长 Leaf length (cm)	叶片宽 Leaf width (cm)	叶柄长 Petiole length (cm)	叶柄宽 Petiole width (cm)	叶片内叶柄长度 Petiole length within the blade (cm)
3	CK (25/18)	8.06±0.25a	4.59±0.27a	4.76±0.23a	1.72±0.06a	1.73±0.02b
	32/22	8.02±0.56a	4.56±0.21a	4.75±0.07a	1.71±0.03a	1.75±0.04b
	35/25	7.85±0.07a	4.44±0.26a	4.79±0.09a	1.70±0.02a	1.88±0.02a
	38/28	7.49±0.31a	4.36±0.12a	4.78±0.12a	1.68±0.02a	1.97±0.04a
6	CK (25/18)	9.24±0.31a	5.13±0.41a	5.07±0.09a	1.76±0.05a	1.87±0.01c
	32/22	9.13±0.23a	5.02±0.14ab	5.09±0.04a	1.74±0.02a	1.86±0.02c
	35/25	8.59±0.37b	4.86±0.26b	5.23±0.08a	1.73±0.01a	2.04±0.03b
	38/28	8.12±0.26b	4.58±0.24b	5.24±0.16a	1.70±0.03a	2.29±0.01a
9	CK (25/18)	10.34±0.54a	5.72±0.39a	5.49±0.1a	1.82±0.02a	1.93±0.02c
	32/22	10.28±0.31a	5.58±0.25ab	5.53±0.09a	1.79±0.02a	1.99±0.06c
	35/25	9.63±0.17a	5.31±0.09ab	5.68±0.17a	1.73±0.01b	2.26±0.04b
	38/28	7.34±0.14b	4.02±0.10a	4.69±0.19b	1.43±0.04c	2.37±0.01a
12	CK (25/18)	11.59±0.31a	6.16±0.14a	5.86±0.42c	1.93±0.05a	2.01±0.04b
	32/22	11.19±0.36a	5.83±0.05ab	5.94±0.06b	1.87±0.01a	2.08±0.44b
	35/25	10.09±0.40b	5.53±0.13b	6.08±0.08a	1.78±0.04b	2.43±0.49a
	38/28	5.78±0.62c	3.34±0.14c	4.06±0.14d	1.12±0.04c	2.27±0.01b

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平同一处理时间不同温度间差异显著。Different lowercase letters mean significant differences among treatments at the same stress time at 0.05 level.

2.3　高温对小白菜卷叶率、SPAD 和单位面积产量的影响

表 3 为不同温度下小白菜卷叶率、SPAD 和单位面积产量的变化。随着温度的升高，卷叶率呈增大的趋势，且随着持续时间的增加，与 CK 的差异逐渐增大。38 ℃/28 ℃处理持续 9 d 开始，卷叶率达到 100%。小白菜 SPAD 值在各处理天数下均符合 CK 最大的规律，随着温度的升高, SPAD 呈减小的趋势，且随着持续时间的延长，与 CK 的差异逐渐增大，与 CK 相比, 38 ℃/28 ℃处理 3 d、6 d、9 d、12 d 的 SPAD 值分别减少 19.95%、31.09%、40.28%、53.82%。随着处理温度的升高，单位面积产量逐渐降低，且随着胁迫时间的延长，与 CK 的差异逐渐增大，32 ℃/22 ℃、35 ℃/25 ℃、38 ℃/28 ℃处理 12 d 的单位面积产量分别较 CK 减少 52.31%、68.9%、86.38%。

2.4　高温对小白菜品质的影响

表 4 为不同温度处理下小白菜内在品质的变化情况。从表中可以看出 32 ℃/22 ℃、35 ℃/25 ℃和 38 ℃/28 ℃处理下，小白菜粗纤维含量随胁迫程度的增加而呈现出增加的趋势。并且随着胁迫时间的延长，其增加的幅度呈现增大的趋势。粗纤维含量以 CK 最少，且均低于其他温度处理。其中，38 ℃/28 ℃处理与 CK 差异最显著，与 CK 相比，38 ℃/28 ℃处理 3 d、6 d、9 d、12 d 的粗纤维含量分别增加 14.47%、21.51%、22.88%、18.75%。

各个持续处理天数下可溶性糖含量均以 38 ℃/28 ℃处理最低，处理 3 d、6 d、9 d 随着胁迫温度的升高，可溶性糖含量呈现出先增加后减少的趋势，38 ℃/28 ℃处理与 CK 差异显著，与 CK 相比，38 ℃/ 28 ℃处理可溶性糖含量分别减少 0.16%、7.79%、32.69%。持续处理 12 d 时，随着温度的升高，可溶性糖含量呈现出降低的趋势，38 ℃/28 ℃处理与 CK 差异显著，其含量比 CK 降低 61.33%。

维生素 C 含量随胁迫温度的升高呈现出降低的趋势，在各个处理天数下维生素 C 含量均以 CK 最高，且均高于其他温度处理。在各处理时段当中，9 d、12 d 维生素 C 含量随胁迫温度的变化显著。38 ℃/28 ℃处理与 CK 的差异最显著，与 CK 相比，38 ℃/28 ℃处理 3 d、6 d、9 d、12 d 的维生素 C 含量分别减少 11.54%、10.97%、32.22%、60.84%。各高温处理后

表 3　不同高温处理对小白菜卷叶率、叶色和单位面积产量的影响

Table 3　Effect of different high-temperature stress treatments on leaf curl index, SPAD and per unit area yield of pakchoi

胁迫时间 Stress time (d)	昼/夜温度 Day/night temperature (℃)	卷叶率 Rolled leaf rate (%)	SPAD	单位面积产量 Per unit area yield (g·m^{-2})
3	CK (25/18)	0±0d	53.44±0.53a	5 463±64.72a
	32/22	3±0.82c	52.37±0.29b	5 013±69.88b
	35/25	19±1.25b	49.73±0.26c	4 666.5±77.41c
	38/28	40±0.94a	42.78±0.3d	4 263±56.79d
6	CK (25/18)	0±0d	53.65±0.43a	5 339±62.47a
	32/22	19±3.27c	50.46±0.33b	3 681±57.8b
	35/25	35±0.47b	47.83±0.32c	3 676.5±62.21b
	38/28	76±2.49a	36.97±0.13d	3 442.5±59.81c
9	CK (25/18)	0±0.47d	52.98±0.1a	5 269±60.1a
	32/22	38±4.11c	48.73±0.4b	2 922±34.63b
	35/25	69±3.56b	44.51±0.21c	2 770.5±33.26c
	38/28	100±0.94a	31.64±0.59d	2 748±45.22c
12	CK (25/18)	3±0.94d	54.92±0.41a	5 451±42.56a
	32/22	53±2.87c	46.24±0.44b	2 599.5±67.77b
	35/25	86±0.49b	42.77±0.42c	1 695.4±33.42c
	38/28	100±0.47a	25.36±0.74d	742.3±48.41d

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平同一处理时间不同温度间差异显著。Different lowercase letters mean significant differences among treatments at the same stress time at 0.05 level.

表 4　不同高温处理对小白菜内在品质的影响

Table 4　Effect of different high temperature treatments on contents of cellulose, soluble sugar, vitamin C, soluble protein of pakchoi

胁迫时间 Stress time (d)	昼/夜温度 Day/night temperature (℃)	粗纤维 Cellulose (%)	可溶性糖 Soluble sugar [g·(100g)$^{-1}$]	维生素 C Vc [mg·(100g)$^{-1}$]	可溶性蛋白 Soluble protein [mg·(100g)$^{-1}$]
3	CK (25/18)	9.33±0.19c	20.18±0.55ab	20.88±0.48a	46.92±0.99c
	32/22	9.42±0.32c	20.95±0.46a	20.47±0.89a	48.25±1.12b
	35/25	9.98±0.27b	21.02±0.82a	20.01±0.67a	49.23±0.85a
	38/28	10.67±0.44a	20.13±0.59b	18.47±0.82b	49.56±0.89a
6	CK (25/18)	9.78±0.11c	20.94±0.46c	21.34±0.37a	49.82±1.23a
	32/22	9.86±0.42c	21.47±0.85b	20.84±0.57a	49.95±0.77a
	35/25	10.28±0.26b	21.86±0.92a	20.48±0.47b	48.67±0.71b
	38/28	11.89±0.39a	19.31±0.23d	19.00±0.78b	45.27±0.9c
9	CK (25/18)	10.16±0.57d	21.58±0.47b	22.75±0.84a	52.48±0.88a
	32/22	10.35±0.18c	21.85±0.65a	21.63±0.63b	48.58±0.63b
	35/25	11.08±0.36b	21.47±0.38b	21.17±0.77b	47.52±0.72b
	38/28	12.48±0.32a	14.53±0.37c	15.42±0.60c	30.47±1.28c
12	CK (25/18)	10.69±0.20c	22.17±0.74a	23.52±0.83a	55.24±0.93a
	32/22	10.94±0.41c	21.64±0.59ab	22.03±0.79b	47.21±0.38a
	35/25	11.88±0.33b	21.05±0.37b	21.85±0.84b	45.21±0.74ab
	38/28	12.69±0.17a	8.57±0.21c	9.21±0.85c	10.76±0.56c

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平同一处理时间不同温度间差异显著。Different lowercase letters mean significant differences among treatments at the same stress time at 0.05 level.

可溶性蛋白含量随温度胁迫的变化均显著。高温处理 3 d 随胁迫温度的升高，可溶性蛋白含量呈增加的趋势，与 CK 相比，32 ℃/22 ℃、35 ℃/25℃、38 ℃/ 28 ℃处理下可溶性蛋白含量分别增加 2.83%、4.92%、5.63%。高温处理 6 d、9 d、12 d 可溶性蛋白含量随处理温度的升高呈现出减少的趋势，与 CK 相比，

38 ℃/28 ℃处理 6 d、9 d、12 d 可溶性蛋白含量分别减少 9.13%、41.94%、80.52%。

2.5　小白菜卷叶率和产量与温度和持续时间的关系

通过多元回归方法，利用前 3 批试验数据分别构建了小白菜卷叶率和单位面积产量与最高处理气温、最低处理气温、平均处理气温及持续时间的关系模型。利用另外 3 批实测数据对模型预测效果进行检验。并找出最优模型。拟合方程与检验结果见表 5。

表 5　小白菜卷叶率(Y_1)、单位面积产量(Y_2)与最高处理温度(T_{max})、最低处理温度(T_{min})、平均处理温度(T_{mean})及各温度处理对应的持续天数(t)间的关系模型

Table 5　Relation models between pakchoi leaf curl index (Y_1), yield (Y_2) and daily highest temperature (T_{max}), daily minimum temperature (T_{min}), daily mean temperature (T_{mean}) and treatment time (t)

模型 Model	相关系数(R^2) Correlation coefficient	标准误差(S.E.) Standard error	相对误差(re) Relative error	回归概率(Fprob) Regression probability
卷叶率 Leaf curl index				
Y_1=−45.652+1.462×T_{max}−11.69×t+0.522×T_{max}×t	0.930	9.35%	0.233 0	<0.005
Y_1=−60.925+2.685×T_{min}−10.737×t+0.683×T_{min}×t	0.959	7.59%	0.189 4	<0.005
Y_1=−52.414+1.943×T_{mean}−11.447×t +0.598×T_{mean}×t	0.948	8.51%	0.212 4	<0.005
单位面积产量 Per unit area yield				
Y_2=5 164.255+12.635×T_{max}+644.678×t−27.503×T_{max}×t	0.962	274.02 g·m^{-2}	0.073 0	<0.005
Y_2=5 172.919+17.153×T_{min}+616.267×t−36.927×T_{min}×t	0.903	438.17 g·m^{-2}	0.116 7	<0.005
Y_2=5 164.169+14.687×T_{mean}+640.9×t−31.827×T_{mean}×t	0.943	336.94 g·m^{-2}	0.089 7	<0.005

由表 5 可以看出，小白菜卷叶率与最低处理温度和最低温度持续时间构建的模型模拟效果最好，模拟模型的回归估计标准误差(S.E.)和相对误差(re)最小，分别为 7.59%和 0.189 4；卷叶率与最高处理温度和最高温度持续时间构建的模型模拟效果最差，模拟模型的回归估计标准误差(S.E.)和相对误差(re)最大，分别为 9.35%和 0.233，是卷叶率与最低处理温度和最低温度持续时间构建模型的 1.23 倍和 1.23 倍。小白菜卷叶率与平均处理温度和平均气温持续时间构建模型模拟效果介于二者之间。

小白菜单位面积产量与最高处理温度和最高温度持续时间构建的模型模拟效果最好，模拟模型的回归估计标准误差(S.E.)和相对误差(re)最小，分别为 274.02 g·m^{-2}和 0.073；单位面积产量与最低处理温度和最低温度持续时间构建的模型模拟效果最差，模拟模型的回归估计标准误差(S.E.)和相对误差(re)最大，分别为 438.17 g·m^{-2}和 0.116 7，是单位面积产量与最高处理温度和最高温度持续时间构建模型的 1.6 倍和 1.6 倍。小白菜单位面积产量与平均处理气温和平均气温持续时间构建模型模拟效果介于二者之间。

2.6　小白菜高温胁迫等级的确定

高温影响小白菜品质和产量[28]。卷叶率(A)是评价外观品质的主要指标[29]，而高温胁迫的减产率(R)是评价影响程度的主要指标[30]，因此由卷叶率和减产率定义高温胁迫指数，并根据指数划分小白菜受害等级。

从表 6 可以看出，随着温度升高和胁迫时间延长，小白菜减产率逐渐增大。高温受害等级在各温度从胁迫第 9 d 开始均为Ⅱ级或Ⅲ级，此时小白菜开始受到中度高温胁迫，减产率分别为 44.54%、47.42%、47.85%、52.31%、68.90%、86.38%，高温胁迫指数也达到 5 以上(9 d 时 32 ℃/22 ℃除外)。从整体上看小白菜受Ⅱ级高温胁迫最多。

3　讨论与结论

本研究发现随着温度的升高，小白菜叶片长、宽度、单株干鲜重和叶片鲜重呈减小趋势，且随着持续时间的延长，其减小量逐渐增大。这与有关报道结果一致[31]，如在高温胁迫下，植物叶片吸水量降低，蒸腾量大于吸水量造成植物叶片萎蔫[32]，随着高温胁迫的持续，叶片出现灼伤的症状[33-35]。并且生育周期变长，短缩茎易伸长，叶片变窄、变薄，植株早衰，品质降低极快[36-37]。随着温度的升高和持续时间的延长，小白菜 SPAD 逐渐减小。这与陶志强等[38]发现不论强耐热性或弱耐热性春玉米(*Zea mays* L.)品种，SPAD 值均随胁迫时间的延长而降低，且胁迫时间越长，降幅越大的结果一致。

表 6 小白菜不同高温热害下减产率以及高温受害等级
Table 6 Pakchoi yield reduction rates under different high temperature treatments

胁迫时间 Stress time (d)	昼/夜温度 Day/night temperature (℃)	减产率 Yield reduction rate (%)	高温胁迫指数 High temperature stress index (I_{HT})	高温受害等级 Thermal suffer level
3	CK (25/18)	0	0	
	32/22	8.24	0.56	I
	35/25	14.58	1.68	I
	38/28	21.97	3.10	II
6	CK (25/18)	0	0	
	32/22	31.05	2.50	I
	35/25	31.14	3.31	II
	38/28	35.52	5.58	II
9	CK (25/18)	0	0	
	32/22	44.54	4.13	II
	35/25	47.42	5.82	II
	38/28	47.85	7.39	III
12	CK (25/18)	0	0.15	
	32/22	52.31	5.27	II
	35/25	68.90	7.75	III
	38/28	86.38	9.32	III

植物在发生逆境时通过调节体内渗透物质适应胁迫[39]。其中可溶性糖和可溶性蛋白为植物细胞内主要渗透调节物质[40]。高温能促使蛋白质的分解，耐热品种的蛋白质分解速度较慢[41]。本研究发现短期高温胁迫可使叶片内可溶性蛋白含量增加，可溶性蛋白含量随胁迫温度的升高有一个逐渐增加的过程，这可能是逆境下新蛋白质合成的热激蛋白已参与抗热反应[42]。随着胁迫的加重，小白菜叶片内的可溶性蛋白含量的减少可能由于高温影响膜系统等的正常工作，从膜上或其他结合形式中降解释放的蛋白质减少。在胁迫过程中，与对照相比蛋白质含量有规律的减少，这证明了可溶性蛋白含量的减少与抗逆性也有着密切关系[13]。植物细胞内可溶性糖不仅可以调节植物细胞内的渗透平衡以适应高温，还可保持蛋白质的水合度，防止原生质脱水[43]。本研究发现可溶性糖含量在高温胁迫下的变化趋势与可溶性蛋白类似，短期高温胁迫下可溶性糖含量随温度的升高而增加，随胁迫时间的延长，温度越高，可溶性糖含量越少，这与有关研究结果一致[44]。如李艳艳等[45]研究指出，热敏系品种茄子(*Solanum melongena* L.)在高温胁迫初期可溶性糖含量显著增加，随胁迫时间的延长可溶性糖含量出现显著下降的趋势，高温胁迫导致叶片中可溶性糖在胁迫初期显著升高，可能与淀粉的分解有关，而在胁迫后期则显著下降，这可能与高温影响了叶片的光合能力，导致光合产物急剧减少有关。

本研究根据小白菜产量和卷叶率定义了高温胁迫指数并划分了受害等级。发现高温胁迫 9 d 开始受害等级达 II 级以上，相对于减产率，卷叶率更易受高温胁迫的影响，38 ℃/28 ℃处理卷叶率在各时段均达 40%以上。

通过研究发现高温胁迫使小白菜外观品质变差，营养含量降低，随着胁迫的加剧，减产严重。小白菜卷叶率、单位面积产量分别与最低处理温度和最低温度持续时间、最高处理温度和最高温度持续时间构建模型模拟效果最好，模拟模型可为开展黄瓜生产管理提供决策性意见。本研究未区分不同作物基因型在高温下产量和品质的不同响应，试验设置的温度处理也具有一定的局限性。因此研究不同高温梯度对不同耐热型小白菜品种的影响还有待进一步研究。

参考文献 References

[1] 高丽红, 李式军. 生菜再生苗耐高温生理基础[J]. 南京农业大学学报, 1994, 17(2): 23–27
Gao L H, Li S J. Physiological basis of heat tolerance in regenerated lettuce[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1994, 17(2): 23–27
[2] 侯喜林, 曹寿椿, 管晓春, 等. 抗热白菜新品种‘矮抗 6 号’[J]. 园艺学报, 2003, 30(6): 762
Hou X L, Cao S C, Guan X C, et al. A new heat-resistant

non-heading Chinese cabbage variety 'Dwarf Resistant 6'[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2003, 30(6): 762

[3] 胡俏强, 陈龙正, 张永吉, 等. 普通白菜苗期耐热性鉴定方法研究[J]. 中国蔬菜, 2011, (2): 56–61
Hu Q Q, Chen L Z, Zhang Y J, et al. Studies on heat tolerance identification method for non-heading Chinese cabbage [*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis* (L.) Makino var. *communis* Tsen et Lee][J]. China Vegetables, 2011, (2): 56–61

[4] 张宏彦. 蔬菜养分调控与品质[J]. 中国蔬菜, 2005, (S): 23–26
Zhang H Y. Nutrient regulation and vegetable quality[J]. China Vegetables, 2005, (S): 23–26

[5] 赵晓东. 小白菜耐热生理生化指标及遗传多样性的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013
Zhao X D. Studies on physiological & biochemical indexes in thermotolerance and genetic diversity of *Brassica campestris* ssp. *chinensis* L.[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013

[6] 赵索, 陈丽, 周传余, 等. 小白菜品系的耐热性鉴定[J]. 黑龙江农业科学, 2014, (7): 86–91
Zhao S, Chen L, Zhou C Y, et al. Identification of heat resistance of *Brassica rapa* L.[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2014, (7): 86–91

[7] Zhao X D, Zhang J Y, Fan S Y, et al. Research progress of heat-tolerance of *Brassica campestris* ssp. *chinensis*[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(2): 248–253

[8] 王鑫, 徐乃林, 赵尊练, 等. 花期高温胁迫对线辣椒形态指标及生理特性的影响[J]. 辣椒杂志, 2016, 14(2): 18–21
Wang X, Xu N L, Zhao Z L, et al. Effects of high temperature stress during flowering on morphological and physiological characters in linear hot pepper[J]. Journal of China Capsicum, 2016, 14(2): 18–21

[9] 周伟辉, 薛大伟, 张国平. 高温胁迫下水稻叶片的蛋白响应及其基因型和生育期差异[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 820–831
Zhou W H, Xue D W, Zhang G P. Protein response of rice leaves to high temperature stress and its difference of genotypes at different growth stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(5): 820–831

[10] Patton A J, Cunningham S M, Volenec J J, et al. Differences in freeze tolerance of *Zoysia* grasses: Ⅱ. Carbohydrate and proline accumulation[J]. Crop Science, 2007, 47(5): 2170–2181

[11] 崔璇. 高温胁迫对蓝百合幼苗生理特征的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007
Cui X. Studies on physiological characteristics effects of *Agapanthus africanus* seedlings under high temperature stress[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2007

[12] Wu B H, Génard M, Lobit P, et al. Analysis of citrate accumulation during peach fruit development via a model approach[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(10): 2583–2594

[13] Stenzel N M C, Neves C S V J, Marur C J, et al. Maturation curves and degree-days accumulation for fruits of 'Folha Murcha' orange trees[J]. Scientia Agricola, 2006, 63(3): 219–225

[14] Slaughter D C. Nondestructive maturity assessment methods for mango: A review of literature and identification of future research needs[D]. Davis, California, USA: University of California, 2009: 1–18

[15] Marcelis L F M. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber[J]. Annals of Botany, 1994, 74(1): 43–52

[16] de Koning A N M. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: A quantitative approach[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1994

[17] Tap R F, van Straten G, van Willigenburg L G. A dynamic model for the optimal control of greenhouse tomato crop production[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 2000

[18] Dayan E, Presnov E, Fuchs M. Prediction and calculation of morphological characteristics and distribution of assimilates in the ROSGRO model[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004, 65(1/2): 101–116

[19] 陈丹, 刘云, 卢明. 南宁市大棚早春越夏种植水果黄瓜的小气候评价与调控[J]. 长江蔬菜, 2011, (4): 47–50
Chen D, Liu Y, Lu M. Microclimate evaluation and regulation on greenhouse fruit cucumber planted in early spring over summering in Nanning[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2011, (4): 47–50

[20] 乔志霞, 沈火林, 安岩. 番茄耐高温胁迫能力鉴定方法的研究[J]. 西北农业学报, 2001, 15(6): 114–120
Qiao Z X, Shen H L, An Y. The research on identifying methods in tolerance to high temperature of tomato[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(6): 114–120

[21] 苑玮琦, 胡迪. 利用矩实现植物叶片长宽的测量[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(16): 188–191
Yuan W Q, Hu D. Measurement of leaf blade length and width based on moment[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(16): 188–191

[22] 岳翔. 不结球白菜膳食纤维含量分析及理化特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009
Yue X. Studies on the analysis of dietary fiber content and physiology and biochemistry characteristics in non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* Makino)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009

[23] 郭玉华, 杨伟华, 郁有祝, 等. 蒽酮比色法测定棉花成熟纤维中水溶性总糖含量[J]. 中国棉花, 2011, 38(12): 23–26
Guo Y H, Yang W H, Yu Y Z, et al. Determination of total sugar contents in mature cotton fiber using anthrone colorimetry[J]. China Cotton, 2011, 38(12): 23–26

[24] 庄学平, 张雯, 郑彩霞, 等. 3 种物质对番茄果实中番茄红素合成量的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(19): 5664–5665
Zhuang X P, Zhang W, Zheng C X, et al. Effect of glucose, sodium glutamate and ethephon on synthetic quantity of lycopene in tomato fruits[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(19): 5664–5665
[25] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007
Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M. Physiological and Biochemical Experimental Guidance of Postharvest Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
[26] 金千瑜, 欧阳由男, 禹盛苗, 等. 土壤干旱胁迫对不同水稻品种叶片卷曲的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 17(4): 349–354
Jin Q Y, Ouyang Y N, Yu S M, et al. Influence of soil drought stress on leaf rolling index in different rice varieties[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(4): 349–354
[27] 许凯, 徐翔宇, 李爱花, 等. 基于概率统计方法的承德市农业旱灾风险评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 139–146
Xu K, Xu X Y, Li A H, et al. Assessing agricultural drought disaster risk in Chengde City using stochastic method[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 139–146
[28] 刘静静. 气候因子和肥料结构对小白菜生长和品质的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2013
Liu J J. Influence of cultivation environment and fertilizer on pakchoi growth and quality[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013
[29] 秦仁昌. 中国植物志: 第二卷[M]. 北京: 科学出版社, 1959
Qin R C. Flora Reipublicae Popularis Sinicae: Book Ⅱ[M]. Beijing: Science Press, 1959
[30] 李卫国. 水稻生长模拟与决策支持系统的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005
Li W G. Study on rice growth simulation and decision support system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005
[31] 窦全琴, 隋德宗, 何旭东, 等. 高温对 20 个鸡爪槭品种叶片形态和光合特性的影响[J]. 江苏林业科技, 2014, 41(4): 1–6
Dou Q Q, Sui D Z, He X D, et al. Effects of heat stress on leaf morphology and photosynthetic characteristics of twenty *Acer palmatum* Thunb. cultivars[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2014, 41(4): 1–6
[32] 李伶俐. 夏玉米水分胁迫敏感性及水分适宜度研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015
Li L L. A study over the water stress sensitivity and water suitability of summer maize[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015
[33] 张巨明, 解新明, 董朝霞. 高温胁迫下冷季型草坪草的耐热性评价[J]. 草业学报, 2007, 24(2): 105–109
Zhang J M, Xie X M, Dong Z X. An evaluation on the heat tolerance of cool-season turf grasses under field heat stress[J]. Pratacultural Science, 2007, 24(2): 105–109
[34] 金不换. 干旱胁迫对不同品种早熟禾形态和生理特性影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009
Jin B H. Research on drought stress affect morphological and physiological characteristic of different cultivars of bluegrass[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009
[35] 刘维信, 曹寿椿. 夏季自然高温条件下不结球白菜品种评价及相关性状的研究[J]. 山东农业大学学报, 1993, 24(2): 176–182
Liu W X, Cao S C. A study on evaluation and related characteristics of nonheading Chinese cabbage under summer high temperature[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1993, 24(2): 176–182
[36] Zhao X D, Zhang J Y, Fan S Y, et al. Research progress of heat-tolerance of *Brassica campestris* ssp. *chinensis*[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(2): 248–253
[37] 王新忠, 赵玉国, 吴沿友, 等. 高温胁迫对水稻拔节期净光合速率·SPAD·叶绿素荧光动力学的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(33): 20337–20339
Wang X Z, Zhao Y G, Wu Y Y, et al. Effects of high temperature stress on the chlorophyll fluorescence kinetics, SPAD and net photosynthesis rate of rice (*Oryza satva* L.) in jointing stage[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(33): 20337–20339
[38] 陶志强, 陈源泉, 邹娟秀, 等. 不同耐热型春玉米品种对高温的光谱特征响应[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(2): 520–526
Tao Z Q, Chen Y Q, Zou J X, et al. Spectral characteristics of spring maize varieties with different heat tolerance to high temperature[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(2): 520–526
[39] 吴兆洪, 秦仁昌. 中国蕨类植物科属志[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 47–565
Wu Z H, Qin R C. Genera of Pteridophytes in China[M]. Beijing: Science Press, 1991: 47–565
[40] 韩蕊莲, 李丽霞, 梁宗锁. 干旱胁迫下沙棘叶片细胞膜透性与渗透调节物质研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(1): 23–27
Han R L, Li L X, Liang Z S. Seabuckthorn relative membrane conductivity and osmotic adjustment under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2003, 23(1): 23–27
[41] 宋晓玲, 韩锋溪, 胡景江. 干旱-高温交叉逆境对小麦叶片蛋白质表达的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(10): 22–27
Song X L, Han F X, Hu J J. Effect of drought and heat cross-stress on protein expression in wheat leaves[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2012, 21(10): 22–27
[42] 沈丹婷. 菠菜耐热性的初步研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012
Shen D T. Preliminary study on heat tolerance of spinach (*Spinacia oleracea* L.)[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012

[43] 《福建植物志》编写组. 福建植物志: 第一卷修订版[M]. 福州: 福建科学出版社, 1982: 1–265
Compiling Group of Flora of Fujian. Flora of Fujian: First volume Revised Edition[M]. Fuzhou: Fujian Science Press, 1982: 1–265

[44] 涂三思, 秦天才. 高温胁迫对黄姜叶片脯氨酸、可溶性糖和丙二醛含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2004, 37(4): 98–100
Tu S S, Qin T C. Effect of heat stress on the contents of free proline, soluble sugar and malondiadehyde in *Dioscorea zingiberensis* leaves[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2004, 37(4): 98–100

[45] 李艳艳, 王俊青, 李植良, 等. 短期高温胁迫对茄子主要生理指标及叶片解剖结构的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(9): 1774–1780
Li Y Y, Wang J Q, Li Z L, et al. Effects of short period of high temperature on the main physiological index and anatomical structure of leaves in eggplants with different thermo-tolerance[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(9): 1774–1780